

轨道交通永磁同步牵引系统的发展概况及应用挑战

冯江华

(南车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 永磁同步牵引系统在轨道交通领域已逐步进入到工程化和商业化应用阶段。株洲南车时代电气股份有限公司在沈阳地铁上首先实现了该系统的装车试验, 对于我国轨道交通牵引系统技术的自主创新具有积极而深远的意义。文章在简要介绍国内外轨道交通永磁同步牵引系统发展技术现状的基础上, 阐述了该系统的技术优势及态势, 同时阐明其在轨道交通领域内的应用挑战, 为该系统的发展提供一定的参考。

关键词: 轨道交通; 永磁同步牵引电动机; 永磁同步牵引系统

中图分类号: U260.13; TM351

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2012)03-0001-07

Development Overview and Application Challenges of Permanent Magnet Synchronous Traction System for Rail Transit

FENG Jiang-hua

(CSR Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Permanent magnet synchronous motor (PMSM) traction system in rail transit has gradually entered into engineering and commercialization application stage. Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd. has achieved field trial of PMSM traction system on Shenyang Metro in China firstly, which has a positive and profound significance for the innovation of China's rail transit traction system technology. This paper introduces the status of the domestic and international development of PMSM traction system in rail transit. The merits and application characteristics are introduced, and the application challenges are also presented, which provides a reference for the development of PMSM traction system in rail transit.

Key words: rail transit; permanent magnet synchronous traction motor; permanent magnet synchronous traction system

0 引言

永磁同步牵引系统以其高效节能的特点受到了轨道交通牵引系统开发人员的密切关注。在经历了样机试制、线路试验后, 逐步进入到工程化和商业化应用阶段。国家“十二五”规划对“节能减排、环境保护”做了非常严格的规定, 高效节能的永磁同步牵引系统将为轨道交通的节能减排做出积极的贡献, 为轨道交通的高效、长远发展提供保障。本文介绍了轨道交通永磁同步牵引系统的国内外发展概况, 对轨道交通永磁同步

牵引系统的技术优势、应用特点和应用前景进行了分析, 为轨道交通永磁同步牵引系统的发展提供参考。

1 技术现状

国外, 以东日本铁路公司、东芝公司、西门子公司、阿尔斯通公司和庞巴迪公司为代表的轨道交通装备制造企业竞相开展永磁同步牵引系统的研究, 都已完成样机的开发和试验考核, 逐步进入工程化和商业化应用阶段; 国内, 中国南车集团旗下株洲南车时代电气股份有限公司(以下简称“株洲南车时代电气”)积极开展轨道交通永磁同步牵引系统研究, 完成了地铁车辆永磁同步牵引系统的研制, 并进行了现场的装车考核^[1-3]。

收稿日期: 2012-01-05

作者简介: 冯江华(1964-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 长期从事牵引传动与控制的研究。

1.1 日本各公司^[4-8]

东日本铁路公司(JR East)为电动车组开发了永磁同步直接传动系统(图1),并在103系电动车组上完成了20万km的运行试验。采用永磁同步直接传动系统后 ,动车组噪声低5 dB。

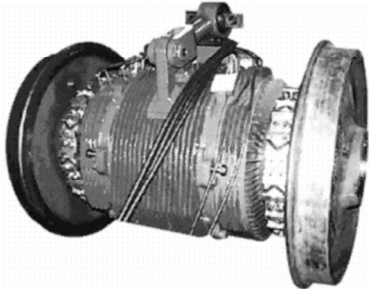


图1 装有直驱永磁同步电机的轮对
Fig.1 Wheel set equipped with PMSM

东芝公司(Toshiba)交通事业部在永磁同步牵引系统方面也加大投入 ,其研发的永磁同步牵引系统已在东京市内地铁投入商业应用(图2)。相比于异步牵引系统 ,采用该系统可节能10% ,噪声可降低2~6 dB。Toshiba 还以360 km/h运营速度为目标 ,为新干线开发了采用永磁同步牵引系统的E954/E955系列机车。该系统具有小型化、低噪声化和系统寿命周期成本低等特点 ,所用的永磁同步牵引电动机额定容量为355 kW ,采用自通风冷却方式 ,质量为440 kg ,额定效率达96.8%(图3)。同时 ,Toshiba针对JR East混合动力机车(货车)研制的永磁同步牵引系统也完成了交货。



(a)永磁同步电动机
(a) PMSM



(b) 东京地铁Ginza线
(b) Tokyo metro Ginza line

图2 地铁用全封闭永磁同步牵引电机
Fig.2 Total closed permanent magnet synchronous traction motor for metro

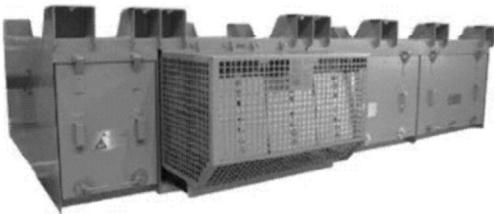


图3 E954用永磁同步牵引电动机
Fig.3 Permanent magnet synchronous traction motor for E954

日立公司和川崎重工公司为东京地铁提供的装有永磁同步牵引系统的16000系列车辆已于2010年投入运营。截至2012年3月 ,共提供了13列该系列列车 ,采用10辆编组。16000系列列车及其所用的永磁同步牵引电动机和牵引逆变器如图4所示。



(a) 永磁同步牵引电动机
(a) Permanent magnet synchronous traction motor



(b) 变压变频逆变器
(b) VVVF inverter



(c) 东京地铁用16000系列列车
(c) 16000 series vehicle for Tokyo Metro

图4 东京地铁用16000系列列车及其永磁同步牵引电动机和牵引逆变器
Fig.4 16000 series vehicle for Tokyo Metro and its PMSM and traction inverter

1.2 西门子公司^[9-11]

西门子公司(Siemens)开发了集合永磁同步牵引电动机的创新型直驱转向架 ,所用的永磁直驱电机如图5所示 ,图6示出该转向架装车试验图。创新型直驱转向架的轴间距为1.6 m ,而传统转向架的轴间距为2.5 m。



图5 直接传动永磁同步电机
Fig.5 PMSM for direct drive



图6 装载直接传动转向架的试验列车
Fig.6 Vehicle with direct drive bogie

Siemens曾联合达姆斯达特大学以 ICE3 高速列车的要求和技术规格为基础 ,开发了抱轴式直接驱动永磁同步牵引电动机 ,并制造了2台500 kW的试验样机 ,其安装结构如图7所示。线路运行试验表明 :与同功率的异步牵引电动机相比 ,永磁同步牵引电动机的损坏率可以降低50% ,质量减轻30% ,噪声降低15 dB。

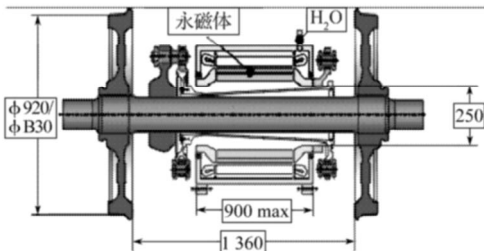


图7 西门子针对 ICE3 开发的永磁同步牵引电动机安装图

Fig.7 Installation diagram of permanent magnet synchronous traction motor for Siemens ICE3

1.3 阿尔斯通公司^[12]

法国阿尔斯通公司(Alston)分别为低地板轻轨车辆Citadis(图8)和改进型单层AGV高速动车组开发了120 kW和720 kW全封闭永磁同步电机(图9),其参数如表1所示。采用永磁同步牵引系统的Citadis型低地板轻轨车辆已于2004年在荷兰Rotterdam得到了应用 ,同时装有永磁同步牵引系统的20列AGV高速列车也于2011年在意大利投入商业运营。

表1 Alston低地板轻轨车辆120 kW和AGV 720 kW 永磁同步电机参数

Tab.1 Parameters of 120 kW PMSM for LRV and 720 kW PMSM for AGV of Alston

参 数	Citadis	A G V 高速列车
最大转速 / r · min ⁻¹	3 600	4 500
牵引功率 / k W	120	720
制动功率 / k W	240	720
极 数	8	12
外部尺寸	φ 380 mm × 420 mm	φ 650 mm × 650 mm
长度 / mm	525	650
质量 / kg	285	730



图8 装有永磁同步牵引电动机的 Citadis 低地板车辆
Fig.8 Citadis LRV equipped with permanent magnet synchronous traction motor

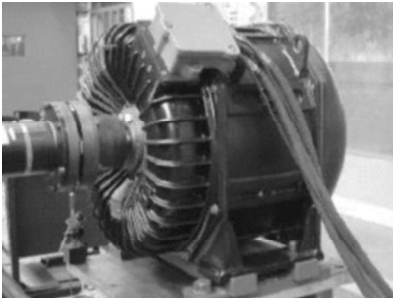


图9 AGV 用永磁同步牵引电动机

Fig.9 Permanent magnet synchronous traction motor for AGV

Alston在2011年针对法国国营铁路公司(SNCF)的需求研制了装有永磁同步牵引系统的区域列车(图10)。该车采用25 kV交流和1 500 V直流双供电制 ,最高运营速度为160 km/h ,装备永磁同步牵引系统可节能15% ,同时便于维护并降低了系统寿命周期成本。SNCF已订购了266列该种区域列车 ,从2013年3月开始交付 ,将一直持续到2015年。



图10 装有永磁同步牵引系统的区域列车

Fig.10 Regional train equipped with PMSM traction system

1.4 庞巴迪公司

庞巴迪公司(Bombardier)研发出Mitrac自通风永磁同步牵引电动机(图11) , SNCF已订购了装有Mitrac永

磁同步牵引系统的129列双层区域列车,从2013年6月开始交付,将一直持续到2016年。2010年瑞士联邦铁路订购了59列安装有Bombardier研发的第二代水冷永磁同步牵引电动机的双层列车。



图11 Mitrac永磁同步牵引电机

Fig.11 Mitrac permanent magnet synchronous traction motor

Bombardier推出了最新的装备永磁同步牵引系统的INN VIA Monorail 300单轨车(图12),展示了中等运量单轨技术领域的最新创新成果,并将首先应用于São Paulo, Brazil, Riyadh及Saudi等城市。



图12 装有永磁同步牵引系统的INN VIA 300单轨车

Fig.12 INN VIA 300 monorail car equipped with PMSM traction system

1.5 斯柯达公司

斯柯达公司(Skoda)针对低地板车开发了永磁同步直接传动系统,其电动机(图13)的额定功率为46.6 kW,装有永磁直驱电机的低地板车如图14所示。

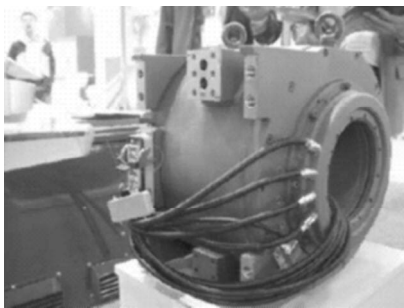


图13 斯柯达永磁直驱电机

Fig.13 Skoda direct drive PMSM



图14 装有永磁直驱电机的低地板车辆

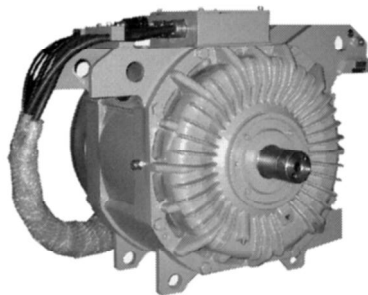
Fig.14 LRV with direct drive PMSM

1.6 中国南车集团^[13]

株洲南车时代电气于2003年开始了永磁同步牵引系统设计方法、永磁同步牵引电动机控制策略、永磁同步牵引电机设计方法及相关制造工艺的研究工作。

首先针对纯电动大巴完成了额定功率100 kW永磁同步牵引电机的试验验证,针对混合动力大巴研制的40 kW/90 kW永磁同步牵引系统已实现商业应用2 000多台,并且首批系统已完成40万km的稳定可靠运行。

2009年,针对地铁车辆进行了永磁同步牵引系统研究,完成了样机的试制和试验平台的搭建。2010年进行地面试验研究,通过多轮样机的试制,成功掌握了地铁车辆永磁同步牵引电动机的设计方法,验证了控制策略和故障保护策略。2011年,在完成装车样机地面组合试验的基础上,在沈阳地铁二号线完成了7 000 km的AW0空载和AW3负载的现场装车试验(图15)。



(a) 永磁同步牵引电动机

(a) Permanent magnet synchronous traction motor



(b) 沈阳地铁二号线永磁同步牵引系统装车车辆

(b) The vehicle equipped with PMSM traction system for Shenyang Metro Line 2

图15 沈阳地铁二号线永磁同步牵引系统装车车辆及其永磁同步牵引电动机

Fig.15 The vehicle equipped with PMSM traction system for Shenyang Metro Line 2 and its permanent magnet synchronous traction motor

2 技术优势

永磁驱动系统的典型优势在于效率高、电机小型化,利于实现新型传动结构。

2.1 实现轨道交通的直接传动^[13]

轨道交通传统的传动方式是电机输出转矩通过齿轮箱传递给轮对从而驱动车辆(图16)。由于采用齿轮

箱传动,传动过程中的损耗和噪声以及齿轮箱油带来的维修等问题长期困扰着我们;同时由于齿轮箱的存在,导致轴间距无法减小,限制了转向架的设计。

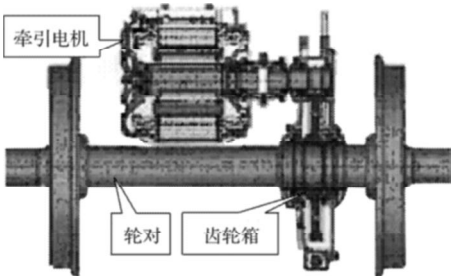


图 16 采用齿轮箱的传动方式示意图

Fig.16 Sketch map of transmission mode with gear box

永磁同步牵引电动机的功率密度高,同时由于采用永磁体励磁,可以做成更多的极数,从而缩短端部尺寸、减小电机尺寸,为城市轨道交通的直接传动提供了可能性,从而可提高传动效率、降低噪声、减少维护费用。

采用直接传动方式后,转向架的设计获得了更多自由的空间。传统地铁车辆的曲线磨耗、轮轨曲线噪声及曲线波浪磨耗是严重影响地铁经济性和安全运行的因素;采用直接传动方式后,取消了齿轮箱,可采用更小的轴距,以降低曲线磨耗。直接传动为转向架的柔性构架设计提供了可能性,可降低轮重减载率,更好地适应线路的不平顺,提高安全性;电机与车轴的一体化可增加径向调节能力,采用直接传动可望彻底解决这一因传统转向架设计而带来的先天缺陷。直接传动技术必定会使传统转向架的设计发生革命性的变化和进步,从而解决因曲线通过性能不良而带来的轮轨侧磨、曲线波磨、轮重减载脱轨、曲线噪声等长期困扰城轨交通的问题,大大提高车辆的经济性和动力学性能。

2.2 降低能耗,实现绿色交通^[13]

我国轨道交通(包括高速铁路、客运专线、城际铁路及城市轨道交通等)网络建设规模与运营里程快速增长,轨道交通系统能耗成为影响运营成本、决定是否可持续发展的重要因素。城市轨道交通能耗一般可分为2个部分,即车辆所消耗的牵引电能(包括旅客列车在正线运营消耗的电能和在车辆段出/入库消耗的电能、列车试车和试验所消耗的电能)和动力照明设备所消耗的电能(包括为保证满足旅客列车安全可靠运营要求的设备、为旅客提供良好乘车环境的设备和保证车站运转的设备、车站的商业区动力照明设备等),具体能耗分布图如图17所示,其中牵引系统能耗约占轨道交通能耗的40%~50%。

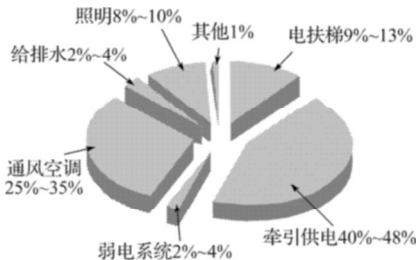


图 17 城市轨道交通能耗图

Fig.17 Energy consumption distribution diagram of urban rail transit

永磁同步牵引电动机由于采用永磁体励磁,无需无功励磁电流,在整个调速范围内都可以保持较高的效率和功率因数。在整个速度范围内,相比于异步牵引系统,永磁同步牵引系统效率可以高3~5个百分点;在低速范围内,其效率的提升表现得更为明显。在额定网压(1 500 V)下,永磁同步牵引系统和异步牵引系统两者效率试验值对比如图18所示。针对沈阳地铁二号线第20列车中的一台永磁同步牵引电动机和一台异步牵引电动机的能耗进行连续测量,结果表明,相比异步牵引电动机,永磁同步牵引电动机可实现节能9.61%。

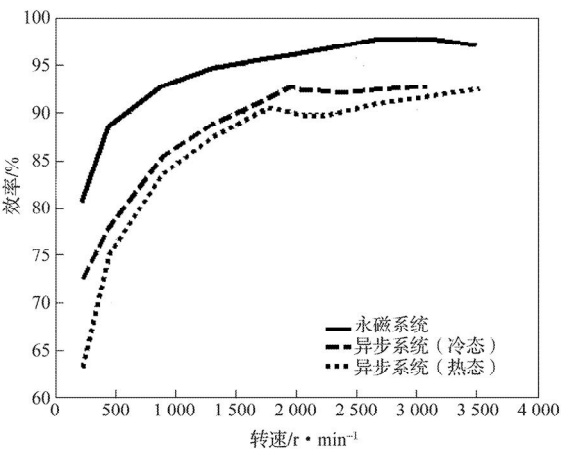


图 18 1 500 V网压下满手柄牵引特性对应的系统效率试验值对比

Fig.18 Efficiency comparisons among systems under 1500V net voltage with full handle

3 技术态势

经过自20世纪90年代初至今20多年的发展,永磁同步牵引系统在国外已经逐步进入到了工程化和商业化推广应用阶段,但是无论从系统设计、永磁同步牵引电动机结构的选择、控制策略的选择等方面,并没有形成一种固定的技术模式,而是各有特色,并且应用领域也各有侧重。

3.1 系统设计

系统设计方面以Alston的AGV和Bombardier的Mitrac模式为经典代表。AGV的牵引特性如图19所示^[12],

其最大的特点是恒功率运行速度范围与转折速度的比例接近等于1,并且选择了600 A的IGBT。这一条件为后续电机的选择提供了基础,并且使AGV永磁同步牵引电动机具有了高功率密度(1 kW/kg)的亮点。

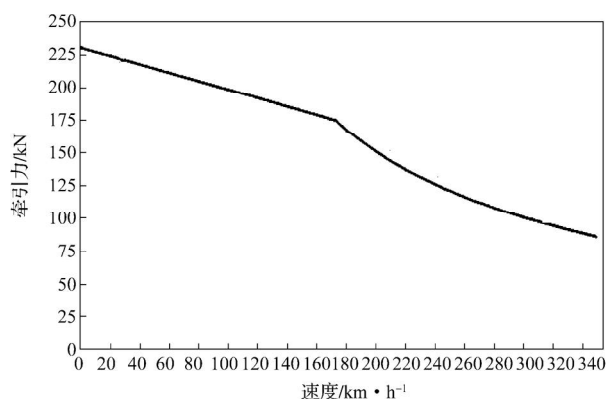


图 19 阿尔斯通 AGV 牵引特性

Fig.19 Traction characteristic of AGV for Alston

Mitrac永磁同步牵引电动机的牵引特性如图20所示。其最大的特点是峰值扭矩大、恒功率范围宽,使得Mitrac永磁同步牵引电动机具备了峰值输出功率可达异步牵引电动机2倍的优点;但电机的重量和体积相比于异步牵引电动机并不存在优势。

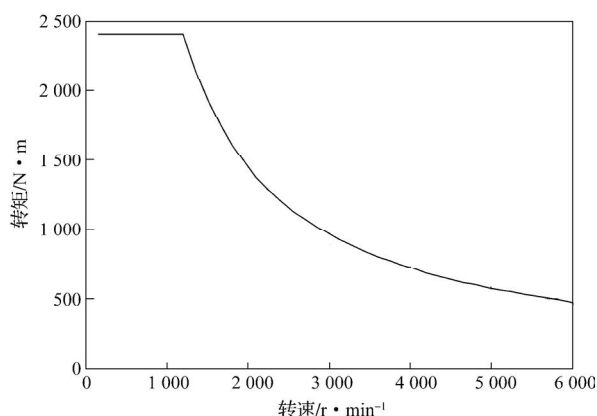


图 20 庞巴迪 Mitrac 永磁同步牵引电动机牵引特性

Fig.20 Traction characteristic of Mitrac permanent magnet synchronous traction motor for Bombardier

进行轨道交通永磁同步牵引系统设计时,在充分了解永磁同步牵引电动机特点的基础上,应考虑到系统所追求的指标,从整车层面对牵引特性进行相应的调整,以充分发挥永磁同步牵引电动机相应的优势。但是目前国内进行永磁同步牵引系统设计时,往往忽视了这一点,通常是要求永磁同步牵引系统既要满足现有的异步牵引系统牵引/制动特性,又要同时具备Alston的AGV高功率密度、Bombardier的Mitrac大输出功率的特点,当然这是难以实现的。

3.2 电机结构的选择^[14-15]

由于采用永磁体励磁,永磁体可以在转子上灵活

布置,所以永磁同步牵引电动机具有结构灵活、形式多样的特点。根据不同的系统方案和不同的牵引特性,目前轨道交通采用的永磁同步牵引电动机也具有不同的定、转子结构。其中转子结构有以Alston AGV的永磁同步牵引电动机为代表的表面式结构,以Bombardier、日本公司、中国南车为代表的内置式结构;定子结构主要有集中绕组和分布绕组,目前大都使用的是分布绕组,集中绕组以Siemens的Syntegra直驱永磁同步牵引电动机为代表。

在进行永磁同步牵引电动机的转子结构选择时,永磁同步牵引电动机反电势值的选取是系统和电机之间争论的焦点。为了充分发挥永磁同步牵引电动机的特点,电机设计人员通常希望选择反电势相对较高的表面式转子结构,并且以AGV永磁同步牵引电动机作为典型代表。但实际上,在车速350 km/h时,AGV对应电机的转速只有3 000 r/min,其对应的反电势只有3 000 V,仍然在系统对反电势的值约束范围内,并且其采用600 A的IGBT也增大了系统容量。

对于最高转速与转折转速比较大的系统,比如Mitrac,永磁同步牵引电动机通常采用内置式结构。在系统要求的反电势值的限制下,通过充分利用磁阻转矩不仅能满足系统转矩特性要求,同时又不增加系统的容量。

轨道交通永磁同步牵引电动机的选择是在系统指标约束条件下、针对系统具体的特点、以充分发挥永磁同步牵引电动机的特点为原则,进行永磁同步牵引电动机结构的选择。

4 应用挑战

从低地板车辆、地铁车辆、城际区域列车到高速动车组和货运机车,都有关于轨道交通永磁同步牵引系统的研究和应用。虽然永磁同步牵引系统在效率及能耗方面有优势,但是由于永磁同步牵引电动机的特点,其在轨道交通(尤其是国内轨道交通)领域内的应用存在一些挑战。

4.1 经济性

异步电动机由于转差的存在,可以采用车控(一个模块驱动4台异步牵引电动机)或架控(一个模块驱动2台异步牵引电动机)模式。

由于永磁同步牵引电动机属于同步电机的范畴,即不存在转差,转子转速与定子频率严格成正比, $n=60f/p$ (其中 n 为电机转子转速, f 为电机定子供电频率, p 为电机极对数)。对于轨道交通车辆,同时有多台

电机工作,每台电机的线速度跟随整车的速度保持一致,即所有永磁同步牵引电动机对应的轮对的线速度是一致的。但是由于车轮轮径不可能完全一致(即不同轮对对应的永磁同步牵引电动机的旋转速度可能不一致),而永磁同步牵引电动机的转子旋转速度与定子的供电频率严格成正比,因此,不同轮对对应的永磁同步牵引电动机的定子的供电频率有可能不一致(即需考虑不同轮对有可能轮径不一致情况)。所以不同的永磁同步牵引电动机不能采用同一个逆变模块供电,即不能采用异步牵引系统中的车控或架控的群控模式,必须采用一个逆变模块驱动一台永磁同步牵引电动机的轴控模式。

曾有学者从粘着控制的角度,利用寄生转矩来补偿轮径不一致以实现永磁同步牵引系统的群控模式,但是研究表明这种做法是不可行的^[16]。虽然轴控增加了系统动力冗余,但由于模块数量的增加和隔离接触器及相关附件的增加,无疑增加了系统初期投入成本。

4.2 永磁体失磁风险

永磁体的失磁风险是普遍担心的问题,而永磁同步牵引电动机缺乏20年以上的应用经验。为降低永磁同步牵引电动机的失磁风险,需要对永磁同步牵引电动机的失磁原理进行认真分析,充分掌握失磁机理,在此基础上从系统设计、电机设计和控制策略上对永磁同步牵引电动机的失磁进行预防,降低失磁风险,保证永磁同步牵引电动机的正常工作。

4.3 系统的故障处理能力

永磁同步牵引电动机由于采用永磁体励磁,磁场无法关断,给系统的故障处理带来难度,有可能造成系统故障的进一步扩大,并且给救援带来困难。为此,在提高系统可靠性的基础上,需要合理的设计系统,避免故障模式时对系统造成致命的影响。

5 结语

虽然永磁同步牵引系统在实际应用过程中存在一些疑虑(尤其是在国内),但随着技术的进步和节能减排压力的日益增大,高效节能的永磁同步牵引系统必将在绿色轨道交通的建设中发挥作用,同时采用永磁同步牵引电动机实现直接传动将给轨道交通牵引系统传动

效率和车辆动力学性能带来明显的优势。轨道交通永磁同步牵引传动技术的发展将推动我国具有自主知识产权的新一代轨道交通牵引系统的发展,缩小与国外先进技术的差距,对于我国轨道交通牵引系统技术的自主创新具有积极而深远的影响。

参考文献:

- [1] 冯江华. 轨道交通永磁同步牵引系统研究[J]. 机车电传动, 2010(5): 15-21.
- [2] 刘可安. 城市轨道交通永磁同步牵引系统发展[J]. 铁路技术创新, 2011(5): 11-15.
- [3] 许峻峰, 冯江华. 永磁同步传动系统的应用概况[J]. 大功率变流技术, 2010(1): 38-44.
- [4] Kondo K. Control System of Permanent Magnet Synchronous Motor for Railway Vehicle Traction[J]. QR of RTRI, 2000, 41(2): 94-99.
- [5] Kondo M. Totally Enclosed Permanent Magnet Synchronous Motor for Commuter Trains[J]. QR of RTRI, 2005, 46(2): 90-96.
- [6] Yoshida K. Development of Main Circuit System using Direct Drive Motor (DDM)[J]. JR EAST Technical Review, 2002(1): 46-52.
- [7] Horiuchi M. Outline of Shinkansen High-speed Test Train Type E955(FASTECH 360Z)[J]. JR EAST Technical Review, 2006(8): 6-10.
- [8] Hirotoishi K. Permanent-Magnet Synchronous Motor Propulsion System for Tokyo Metro Ginza Line Trains[J]. Toshiba Review: 2008, 63(6): 45-49.
- [9] Steimel A. Power-electronics issues of modern electric railway systems[J]. Advances in Electrical and Computer Engineering, 2010, 10(2): 3-10.
- [10] Klockow T. 永久磁铁励磁的牵引电动机[J]. 变流技术与电力牵引, 2003(4): 37-39, 44.
- [11] Germishuizen J, Joeckel A, Hoffmann T, et al. Syntegra™-Next Generation traction drive system, total integration of traction, bogie and braking technology[C]// International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Taormina, 2006: 1073-1077.
- [12] Belin S, Scrooby M. A PMSM based control for traction applications[C]// EPE, Toulouse, 2003: 1-10.
- [13] 冯江华. 城轨车辆用永磁同步电机驱动系统控制策略研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- [14] 冯江华, 桂卫华, 符敏利, 等. 铁道车辆牵引系统用永磁同步电机比较[J]. 铁道学报, 2007, 29(5): 111-116.
- [15] 唐任远. 现代永磁电机: 理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [16] Koerner O. 市郊列车永磁同步牵引电动机成组驱动的可行性[J]. 变流技术与电力牵引, 2005(4): 17-22.